

해양소수력발전소 튜블러 수차 성능평가를 위한 현장시험

황영호¹ · 이영호² · 최영도[†]

(원고접수일 : 2011년 10월 20일, 원고수정일 : 2011년 11월 15일, 심사완료일 : 2011년 11월 18일)

Field Test for Performance Evaluation of a Tubular Turbine in Marine Small Hydro Power Plant

Yeong-Ho Hwang¹ · Young-Ho Lee² · Young-Do Choi[†]

요약 : 본 연구는 해양소수력발전소에서의 튜블러 수차의 성능평가를 위한 현장시험 및 그 결과에 대한 내용을 포함하고 있다. 현장시험용 수차의 발전기 최소출력은 측정된 유효낙차, 출력 그리고 효율을 이용하여 검토되었다. 정격 및 최대 출력시험은 수차 설치현장의 조수간만의 차에 의한 영으로 인하여 동일한 실험조건을 확보할 수 없었기 때문에 모델시험에 의한 성능 데이터를 이용하여 환산된 값을 사용하였다. 현장시험에 의한 수차의 성능은 최소출력, 정격출력, 최대출력 운전점에서 보증출력 및 보증효율을 만족시키는 결과를 나타냄을 확인하였다.

주제어 : 해양소수력발전소, 튜블러 수차, 성능평가, 현장시험, 효율

Abstract: This study includes field test results for performance evaluation of a tubular turbine in marine small hydro power plant. Minimum output power of the tested turbine generator is examined with using of the measured effective head, output power and efficiency. For the rated and maximum output power tests, corrected values from the result of turbine model test are used for the performance evaluation, because experimental conditions of field test at the rated and maximum output powers are restricted correctly. Performance of the test turbine shows good conformance with the suggested guarantee values of output power and efficiency at the measured points of minimum, rated and maximum output power.

Key words: marine small hydro power plant, tubular hydro turbine, Performance evaluation, field test, efficiency

1. 서 론

소수력발전을 위한 에너지자원 부존자원이 우리 주위에 많이 존재하고 있기 때문에 이를 효율적으로 이용하기 위한 여러 종류의 소수력용 수차가 개발되어 이를 실용화시키는 연구개발이 진행되고 있다[1-7].

최근에는 해안가의 육상 양어장에서 사용 후 바다로 흘려보내는 해수 방류수를 이용한 해양소수력발전에 대해서도 관심이 높아지고 있으며, 우리

나라에서는 제주도를 비롯하여 남해안 연안에 많은 양어장이 분포하고 있다.

양어장 방류수를 이용한 해양소수력발전은 양어장 운영의 특성상 유량과 낙차가 항상 일정하게 유지되는 장점이 있다. 따라서, 이를 해양소수력발전에 이용할 경우 소수력발전 에너지 자원으로 확보될 수 있다.

본 연구에서는 이러한 방류해수를 발생시키는 육상 양어장의 특성을 고려하여 설치되는 해양소

[†] 교신저자(목포대학교 기계공학과, E-mail:ydchoi@mokpo.ac.kr, Tel: 061-450-2419)

1 (주)신한정공

2 한국해양대학교 기계정보공학부

수력 발전 수차의 성능을 확인하는 현장시험에 대해서 검토하였다. 계측 가능한 범위의 데이터를 이용한 성능평가 방법 및 현장시험의 특성상 발전소 설치지점의 환경적 조건에 의해 계측하기 어려운 범위의 성능인자에 대한 수차 모델시험 결과로부터 얻어진 측정 자료를 이용하여 정격부하에서의 보정출력과 보정효율 산정법 등에 대해서 검토한 결과를 소개한다.

2. 소수력용 튜블러 수차 및 시험방법

2.1 해양소수력발전용 튜블러 수차

Figure 1은 제주 행원리에 설치된 해양소수력발전소 조감도를 보이고 있는데, 이 발전소는 해수를 사용하는 육상 양어장의 폐수 방류구가 위치한 해안가에 설치되어 있다. 발전소 내부에는 발전출력의 크기가 동일한 2대의 튜블러 수차가 운전 중이며, 작동유체로는 양어장 폐수를 사용한다.

Figure 2는 해양소수력발전소 내부에 설치되어 있는 튜블러 수차의 단면도를 보이고 있으며, Table 1은 튜블러 수차의 사양을 나타내고 있다.

튜블러 수차의 설계점 낙차, 유량, 회전수는 각각 $h = 2.0 \text{ m}$, $Q = 2.75 \text{ m}^3/\text{s}$, $n = 200 \text{ min}^{-1}$ 이고, 정격출력은 30kW이다. 발전기는 횡축 3상 유도전동기를 사용하며, 수차 외부의 케이싱 상부에 발전기를 설치하고 수차의 주축으로부터 벨트를 이용하여 발전기까지 동력을 전달하는 구조로 되어 있다.

러너 베인의 매수는 총 4매를 설치하였으며, 러너 베인의 개도는 최적효율을 달성할 수 있도록 유량에 따라 각도를 변경할 수 있는 가동형 구조로

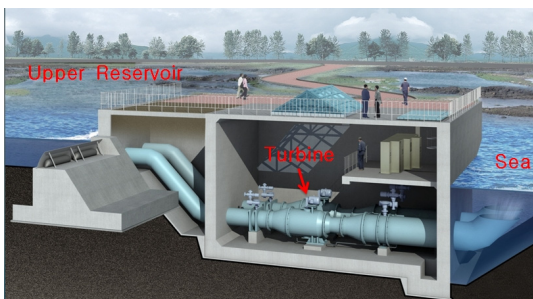


Figure 1: Aerial view of marine small hydro power plant at Jeju Haengwon-ri.

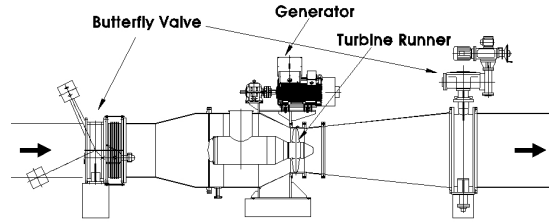


Figure 2: Cross-sectional view of test tubular turbine.

Table 1: Specifications of test hydro turbine

Type	Specification
Rated output power [kW]	30
Head [m]	2.0
Flow rate [m ³ /s]	2.75
Rotational speed [min ⁻¹]	200
EL. of turbine center [m]	EL. -3.474

설계되었으며, 수차의 상류와 하류에는 버터플라이 밸브를 각각 설치하여 상류 유입유량 조절과 정기 점검 등의 유지보수작업 시 방출구에서 해수가 역류되는 것을 차단하는 기능을 구비하도록 하였다.

2.2 성능시험 방법

본 연구를 통하여 수행한 종합성능시험 결과 자동기동시험, 자동정지시험, 부하차단시험, 비상정지시험, 부하시험, 진동·소음시험 등은 설계사양에 부합됨을 확인하였으며, 현장에서의 환경조건 제한으로 확인이 불가능한 유효낙차는 출력시험과 수차 효율시험으로부터 얻어진 측정 자료를 검토하였다.

성능보증을 확인하는데 관련되는 항목으로 최소출력 7kW, 정격출력 30kW, 최대출력 60kW (30kW× 2기) 이상이어야 하는 3종류의 출력에 대한 성능시험 결과를 도출하는 것을 목표로 하였다. 발전기 출력은 전력계(Power meter)로 계측된 발전량을 사용하였으며, 러너 개도에 따른 수차성능을 검토하였다.

유효낙차는 튜블러수차의 상류측과 하류측 유입관 벽면에 설치된 정압공을 통하여 압력을 측정하

고, 그 차압과 흐름에 의한 동압의 합으로 유효낙차를 산출하였으며, 정격출력 및 최대출력시험을 위한 유효낙차 2m 이상이어야 하는 시험조건은 현장상황 때문에 유효낙차가 확보되지 못하였기 때문에 Figure 3의 수차모델시험에 의한 H-P_t곡선에 근거하여 정격출력 및 최대출력 범위에서의 유효낙차 및 출력 값으로 하였다.

한편, 유량에 대해서도 현장에서의 시험조건 상 수차성능시험 전범위에 대한 유효낙차를 확보할 수 없었기 때문에 Figure 4의 수차모델시험에 의한 H-Q곡선에 근거하여 유량 값으로 하였다.

모델시험에서의 최소 출력시험은 수차 1호기와 2호기의 러너 베인 개도를 동일하게 30% 개방한 상태에서 수행하였고, 정격 및 최대 출력시험에서는 이를 러너 베인 개도를 동일하게 70% 개방한 상태를 유지하였다.

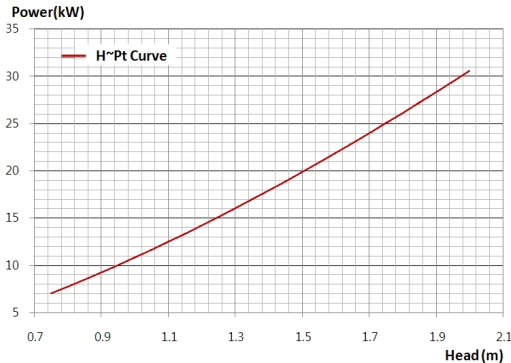


Figure 3: Estimated tubular turbine H-P_t curve from model test.

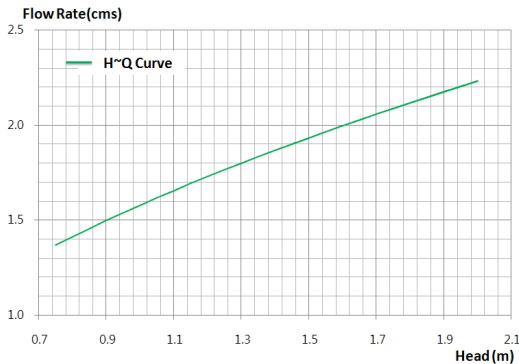


Figure 4: Estimated tubular turbine H-Q curve from model test.

수차효율에 대해서는 초음파 유량계법에 근거하여 수차의 상대효율을 산출하였다. 이 방법은 주파수 차를 이용한 초음파법에 의해 수압관 내의 유속을 측정하고, 유량의 상대치를 구하거나, 낙차에 대한 유량 계산식(식 1)으로부터 상사법을 통하여 상대유량을 구하였다.

$$Q = 0.089H^3 - 0.548H^2 + 1.791H + 0.556 \quad (1)$$

수차발전기의 성능시험 측정방법은 수력발전소 발주자, 설치자, 수차 제조사간의 협의에 의한 JEC-4002[8]의 기준에 따르며, 시험점은 효율을 보증할 전체 범위를 포함하도록 원칙으로서 4점 이상을 선정하였다. 부하조건은 최고효율점 유량에서 부하 25%, 50%, 75%, 100% 및 무부하 상태에서 시험하였다.

각 시험점에 대해서 측정회수는 2회 이상, 매회당 측정시간 5분 이상을 원칙으로 함을 감안하여 10회를 읽어 그 결과를 기록하였다.

시험 중에는 러너개도의 변동을 방지하도록 하였으며, 각 부하에서의 변동율은 회전수 ± 0.3% 이내, 유효낙차 ± 0.7% 이내, 측정부하 또는 러너개도의 변동폭 ± 1.0% 이내로 하였다. 부하설정 후 가동보의 뱀수위, 회전속도 등이 안전한 상태이고 각 측정장치가 정상인지를 확인하고 나서 시험을 수행하였다.

본 연구에서 적용한 수차효율과 관련된 계산식은 다음과 같다.

$$P_m = \frac{P_G}{\eta_G} \times 100 \quad (2)$$

$$P_h = \frac{\rho \times g \times Q \times H}{1000} \quad (3)$$

$$\eta_T = \frac{P_m}{P_h} \times 100 \quad (4)$$

$$Q_c = Q \times \sqrt{\frac{H_r}{H}} \quad (5)$$

$$P_c = P_m \times \left(\frac{H_r}{H} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

여기서, P, H, Q, η는 각각 출력, 유효낙차, 유량,

효율을 나타내고, g 와 ρ 는 각각 중력가속도와 해수밀도를 나타낸다. 또한, 아래 첨자 m, G, h, T, c, r 은 각각 기계, 발전기, 수동력, 수차, 환산 값, 지정 값을 나타낸다.

2.3 불확도 계산

수차출력의 측정 불확도(estimated systematic uncertainty)는 Table 2의 각 데이터 계측장비의 성능을 고려하여 JEC-4002[8]에 따라서 계산하였다. 실제출력 및 압력을 계측장비로부터 측정할 경우, 각 장비들의 정밀도를 고려하여 측정오차를 계산하여 허용한도를 구하였다. 효율 측정오차는 각 데이터 계측장비의 성능을 고려하여 식 (7)로부터 $\pm 1.8\%$ 임을 확인하였다.

$$f_{\eta} = \pm \sqrt{f_P^2 + f_H^2 + f_{CT,PT}^2} = \pm 1.8(\%) \quad (7)$$

여기서, f_p 와 f_H 는 각각 출력 측정오차와 유효낙차에 대한 측정오차이며, 이들 모두 $\pm 0.8\%$ 정도를 택하였다. 또한, f_{CT} 와 f_{PT} 는 일종의 전류를 측정하는 변류기와 전압을 측정하는 변성기의 측정오차로 이들 모두 $\pm 1.0\%$ 정도를 택하였다.

Table 2: Specification of measuring equipment

Equipment	Model	Maker	Measuring Data
Digital Protection Relay	VAMP255	VAMP	Generator output power
Pressure Transducer	IGP-10T-22D	KONICS	Static pressure

3. 결과 및 고찰

3.1 최소출력

최소출력시험은 운전 중인 수차의 실제출력을 확인하는 시험이다. 시험 중 3초마다 데이터를 측정하고 10분간 측정된 자료를 평균하여 그 평균치를 최소출력으로 결정하였다. 최소출력의 평가기준은 단위기 당 7kW로 하여 성능시험 당일 12시간 운전 상태에서 확인되고 계측된 최소출력을 기준

으로 평가하였다.

Table 3은 최소출력시험에 의한 계측결과를 나타내고 있으며, 유효낙차 1.4m에서 1호기 및 2호기에서 모두 평균출력이 15kW 이상이므로 최소출력 7kW를 보증함을 확인하였다. 또한, 1호기와 2호기에 대한 시험을 각각 수행하여 상호간의 영향은 배제하도록 하였다.

Figure 5는 12시간 동안의 10분 단위 평균출력 데이터를 나타낸 것이며, 발전소 하류 방출구 측의 조수간만에 따른 수위 차에 근거한 유효낙차의 변화에 따라서 출력 값의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 측정시점은 조수간만의 변화가 적은 날을 선정하여 수행하였으며, 측정 값은 간조와 만조시 해수면 높이의 차이가 크지 않아 Figure 5에서와 같이 최대출력과 최소 출력의 차이가 크게 나타나지 않음을 알 수 있다.

Table 3: Averaged measured data from minimum output power test

Turbine No.	No.1	No.2
Runner vane opening angle [%]	30	30
Ave. inlet pressure [kg/cm ²]	0.51	0.50
Ave. outlet pressure [kg/cm ²]	0.36	0.36
Ave. effective head [m]	1.4	1.4
Ave. generator output power [kW]	15.38	15.04

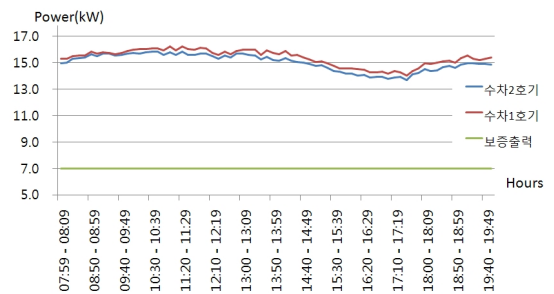


Figure 5: 10minutes averaged output power curve.

Figure 6은 낙차변화에 따른 실제출력과 예상출력 값의 비교를 나타내고 있다. 예상출력 값은 유효낙차와 함께 증가하지만, 일정 낙차 이상 영역에서는 일정한 값을 나타내고 있다. 예상출력 값이 유효낙차의 증가에도 불구하고 일정하게 나타나는 것은 발전소의 측면에 설치된 가동보의 저수량이 최대 저수량을 넘어설 경우 자연적으로 넘침 현상이 일어나므로 상류측 수위는 항상 일정하여 유효낙차의 변동이 없음을 보이고 있다. 그러나 실제로 조수간만의 차로 인하여 출구측 수위의 변동이 있으므로 유효낙차의 변동이 있을 수 있으나 예상출력 값 결정의 단계에서는 이를 고려하지 않았다.

토목공사 후 설치된 터빈을 운전하는 동안 측정된 유효낙차 1.4m에서 측정된 출력은 Figure 6에서와 같이 17kW를 보이고 있다. 이것은 예상성능곡선에서의 추정 값과 거의 일치함을 보이고 있으며, 유효낙차가 더 낮게 측정되는 경우에도 출력보증 조건은 무난히 만족하고 있음을 보이고 있다. 그러나 데이터 측정결과 상부저수지(upper reservoir)측에 위치한 수차 유입관 입구측 수중 흐름의 영향에 의하여 2호기 측의 유입이 원활하지 못하여, 1호기와 2호기를 동시에 운전하여 측정을 할 경우 각 호기별 유효낙차와 출력에 다소간의 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이것은 각 호기별 유입 유량이 일정하게 유입되지 못하는 현상에서 기인하는 것으로 추정된다.

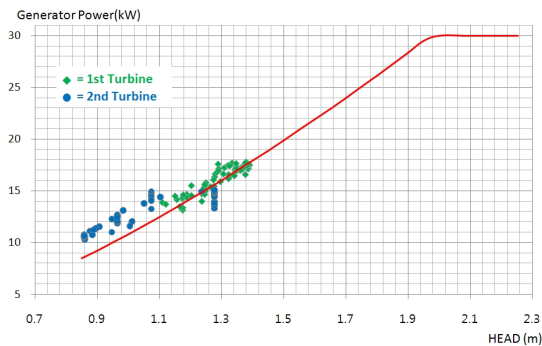


Figure 6: Comparison of H-P_t performance curve by the estimated and measured values.

3.2 정격출력 및 최대출력

정격출력의 기준인 유효낙차 2m 및 최대출력 기준인 최대유효낙차 2.25m를 현장상황 및 민원 등의 사정으로 확보되지 못하여 정격출력시험 및 최대출력시험은 현장에서 측정된 낙차를 기준으로 보정된 출력으로 환산하여 시험을 실시하였다.

정격출력과 최대출력의 평가기준은 각 단위기당 15kW 및 30kW로 결정하여 성능시험일 당일의 12시간 운전 상태를 확인하는 것으로 하였다. 또한 계측된 자료에 의하여 출력의 변동에 따른 출력곡선 값 보정결과를 가지고 정격유효낙차가 2.00m일 때 정격출력 및 최대유효낙차 2.25m일 때 최대출력 값으로 기준을 결정하여 평가하였다.

Table 4는 정격 및 최대출력시험을 위한 러너블레이드 개도, 압력, 유효낙차를 나타내고 있으며, 이때의 측정된 값의 평균치에 대한 발전기에서 측정된 효율과 출력을 보이고 있다. 또한 정격낙차 2.0m로 환산했을 경우의 수차와 발전기에서의 환산출력을 함께 나타내고 있다.

Table 4: Averaged measured data for the rated and max. output power tests

Turbine No.	No.1	No.2
Runner vane opening angle [%]	70	70
Ave. inlet pressure [kg/cm ²]	0.480	0.464
Ave. outlet pressure [kg/cm ²]	0.359	0.366
Tested effective head [m]	1.29	1.05
Measured generator efficiency [%]	92.48	91.49
Measured generator output power [kW]	16.17	13.28
Turbine ave. output power at the corrected effective head of 2.0m [kW]	35.38	40.40
Generator ave. output power at the corrected effective head of 2.0m [kW]	31.09	35.12

Table 5와 Table 6에 정리한 바와 같이 수차발전기 1호기 및 2호기 모두 12시간 발전기 정격출력시험에서 정격낙차 2.0m로 환산하였을 경우 1호기 31.09kW, 2호기 35.12kW, 최대낙차 2.25m로 환산하였을 경우 1호기 37.19kW, 2호기 42.02kW이므로 최대출력 30kW를 보증할 수 있음을 확인하였다.

1호기와 2호기의 수차 및 발전기의 효율과 출력이 다르게 나타나는 이유는 각 수차에 적용되는 유효낙차가 유입량의 차이에 따라서 다르게 나타남에 따라 그 특성 값의 차이에 기인하여 발생한다.

Table 5: Generator averaged rated output power test

Ave. output power (kW) at the rated head			Averaged guarantee output power(kW)		
Total	No. 1	No. 2	Total	No. 1	No. 2
66.21	31.09	35.12	60	30	30

※ Corrected head : 2.0m

Table 6: Generator averaged maximum output power test

Max. output power (kW) at the max. head			Max. guarantee output power(kW)		
Total	No. 1	No. 2	Total	No. 1	No. 2
79.21	37.19	42.02	over 60	30	30

※ Corrected head : 2.25m

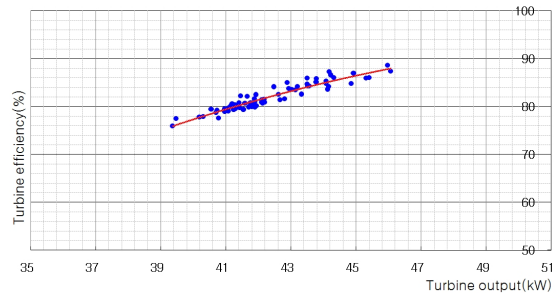
3.3 효율곡선

성능시험에서의 효율은 수차 본체의 출력으로부터 계산되는 수차효율과 발전기의 출력으로부터 계산된 발전기효율로 나눌 수 있다. 일반적으로 보증효율은 발전기출력을 기준으로 하게 되나, 출력에 직접적인 영향을 미치는 가장 중요한 요소는 수차의 효율이다. 발전기의 효율은 제작완료 시 공장검수를 통하여 최소, 정격, 최대 부하에서의 효율을 측정하여 그 값을 기준으로 수차발전기의 전체효율에 적용하게 된다.

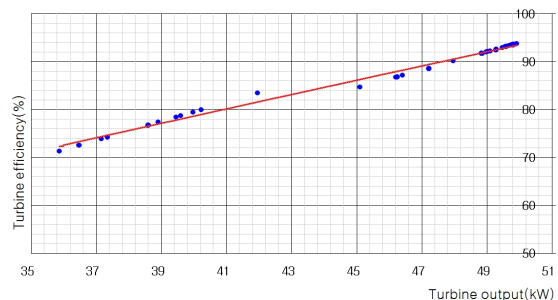
Figure 7은 현장시험에서 측정된 낙차와 출력 값을 모델시험을 통하여 얻어진 예상성능곡선을 이용하여 산출된 정격낙차 2.0m에서의 수차 1호기 및 2호기에서의 보정효율을 나타내고 있다.

1호기와 2호기의 동시 운전 중에 측정된 데이터를 근거로 작성이 되었으며, 압력의 측정범위가 한정되어 상대적으로 압력이 조금만 변경되어도 상사된 출력의 범위는 넓게 나타냄을 알 수 있다. 2호기의 경우는 현장조건의 특수성이 반영되어 압력의 변동 폭이 심하며 상사된 값이 평균값을 기준으로 한 데이터 값의 분포범위가 넓게 나타나고 있다.

이들 성능시험의 결과로부터 효율에 대해서 검토해보면 수차의 보증효율은 80%, 발전기 보증효율은 90%이므로, Table 7에 정리된 수차 평균효율에서 불확도를 감안하면 수차의 평균효율은 1호기 77.7~81.3%, 2호기 78.0%~81.6%이고, 발전기에서의 효율은 Table 5의 결과로부터 90% 이상으로 효율을 보증함을 알 수 있다.



(a) No. 1 turbine



(b) No. 2 turbine

Figure 7: Efficiency curves of No. 1 and No. 2 turbine resulted from output power variation at the corrected effective head of 2.0m.

Table 7: Resultant averaged efficiency at rated output power

Corr. head (m)	Efficiency of turbine No. 1 at rated output power(%)	Efficiency of turbine No. 2 at rated output power(%)
2.0	79.53	79.83

4. 결 론

본 연구는 해양소수력발전소 튜블러수차의 성능평가를 위한 현장시험 및 그 결과에 대해서 검토한 내용이다. 현장시험에서는 시험장소의 환경요인에 따라서 공장시험에서와는 달리 계측 가능한 인자가 제한적이며, 주어진 계측데이터를 이용하여 제시된 출력 및 효율 보증 값에 적합함을 확인시켜야 한다.

따라서, 정격출력 및 최대출력에 대해서는 현장시험 시의 주변 환경요인에 따른 제약조건으로 인하여 적정한 유효낙차를 확보할 수 없어서 수차모델시험에 의한 낙차-출력 성능곡선 및 낙차-유량 성능곡선으로부터 주어진 정격출력 및 최대출력 시험영역에서의 보정된 출력과 효율을 이용하여 성능평가를 수행하였다.

현장시험에 의한 수차의 성능은 최소출력, 정격출력, 최대출력 운전점에서 보증출력 및 보증효율을 만족시키는 결과를 나타냄을 확인하였다.

참고문헌

- [1] T. Tsukamoto, M. Inagaki, T. Watanabe, S. Yamato and M. Nishi, "Characteristics of a micro tubular turbine for the serial arrangement," *Turbomachinery*, vol. 32, no. 3, pp. 176-182, 2004(in Japanese).
- [2] S. H. Nam, Y. T. Kim, Y. D. Choi and Y. H. Lee, "Internal flow analysis of a tubular-type small hydroturbine by runner vane angle," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 32, no. 7, pp. 1044-1050, 2008.
- [3] J. Kurokawa, J. Matsui and Y. D. Choi, "Flow

analysis in positive displacement micro-hydro turbine and development of low pulsation," *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, vol. 1, pp. 76-85, 2008.

- [4] Y. D. Choi, "Performance prediction method of a positive displacement turbine with 4-lobe helical type rotor," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 31, no. 5, pp. 522-530, 2007(in Korean).
- [5] C. A. Mockmore and F. Merryfield, *The Banki Water Turbine*, No. 25, Engineering Experiment Station, Oregon State Colleg, Corvallis, Oregon, 1949.
- [6] S. Khosrowpanah, A. A. Fiuzat and M. L. Albertson, "Experimental study of cross-flow turbine," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 114, no. 3, pp. 299-314, 1988.
- [7] A. A. Fiuzat and B. P. Akerkar, "Power outputs of two stages of cross-flow turbine," *Journal of Energy Engineering*, vol. 117, no. 2, pp. 57-70, 1991.
- [8] 日本電氣學會, 水車およびポンプ水車の効率試験方法, 電氣規格調査會標準規格, 1992.

저 자 소 개



황영호(黃英鎬)

1963년 3월생, 1986년 한국해양대학교 기관학과 졸업 (공학사), 2010년 한국해양대학교 대학원 기계공학과(공학석사), 1998년 - 2006년 신한정밀 대표, 2006년 - 현재 (주)신한정공 대표이사. 관심분야: 소수력발전, 해양에너지, 폐기물 에너지, 유체기계



이영호(李英浩)

1958년 2월생, 1980년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1986-1989년 일본 동경대학 기계공학과(공학박사), 1980년~현재 한국해양대학교 기계·정보공학부 교수, 2001.12~ 2003.6 (재)한국조선기자재연구원 원장(초대), 관심분야: 신·재생에너지, 유체기계, PIV, CFD.



최영도(崔永都)

1970년 6월생, 1996년 한국해양대학교 기계공학과 졸업, 2003년 요코하마국립대학 대학원 박사과정수료(공학박사), 2003년~2006년 요코하마국립대학 대학원 공학연구원 조수, 2009년~현재 목포대학교 기계공학과 조교수, 관심분야 : 소수력발전, 해양에너지, 풍력발전, 유

체기계.